

# Measurement of temperature and strain using fiber-optic surface plasmon resonance sensor

## 광섬유 표면 플라즈몬 공명 센서를 이용한 스트레인 및 온도 측정

Jaehoon Jung\*, Minwook Kim

정재훈\*, 김민욱

### Abstract

This paper describes the strain and temperature sensor using fiber optic surface plasmon resonance sensor. The sensor head is 3-layered, Cr, Ag, Au and we showed feasibility to use this sensor to measure strain and temperature.

### 요약

본 논문에서는 광섬유 표면 플라즈몬 공명 센서를 이용하여 스트레인 및 온도 변화에 따른 센서를 제시하였다. 광섬유 센서의 구조는 광섬유의 클래딩 일부를 제거하여 크롬, 은, 금을 증착한 다층 박막 구조를 모델로 하였고, dip 파장의 변화가 선형성을 보임으로써 효율적인 센서로의 활용 가능성을 보이고자 한다.

Key words : Fiber optic SPR, RCWA, Strain, Temperature

## I. 서론

표면 플라즈몬 공명(Surface Plasmon Resonance: SPR)을 간략히 구현할 수 있는 방법이 제안된 이래 [1,2] 이 현상은 여러 분야에 많이 응용되고 있고 최근 SPR 기술을 이용한 센서에 대한 관심은 폭발적으로 증가하여 왔다. SPR 현상이 처음으로 응용된 곳은 1978년 Pockrand 등에 의해 박막의 특성을 측정하는 분야였고[3], 센서로 응용된 것은 1983년 Liedberg 등에 의해서였다[4]. 그 이후로 SPR 현상은 많은 화학 및 바이오센서 구조에 적용되어 왔다[5,6]. 최근 기존

표면 플라즈몬 공명 구조 센서의 장점과 더불어 매우 작은 크기와 원격 측정이 가능하다는 장점 때문에 광섬유 표면 플라즈몬 공명 센서의 응용을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

기존의 SPR 센서의 관심은 바이오센서에 집중되어 왔지만 본 연구에서는 스트레인 및 온도 변화에 따른 광섬유 SPR 센서의 활용 가능성에 대하여 제시하였다. 광섬유 SPR 센서는 광섬유의 일부 클래딩을 제거하여 크롬(Cr), 은(Ag), 금(Au)를 증착한 다층 박막 구조를 모델로 하였고, dip 파장의 변화가 선형의 성질을 보임으로써 효율적인 센서로의 활용 가능성을 보이고자 한다.

\*檀國大學校 電子컴퓨터工學部

(School of Electronics and Computer Engineering, Dankook University)

※ 감사의 글 (Acknowledgment)

본 연구는 2005년도 대학연구비를 지원받아 수행된 과제임.

接受日:2007年 5月 5日, 修正完了日: 2007年 6月 14日

## II. 본론

### 1. 광섬유 SPR 센서의 구조

스트레인 및 온도 변화에 따른 광섬유 SPR 센서의 반사 스펙트럼 측정을 위하여 그림 1과 같이 구성하

였다. 금속 박막은 주로 사용되는 은(Ag)과 금(Au)을 적용하였고 광섬유와 은의 접촉력을 증가시키기 위하여 그 사이에 얇은 크롬(Cr)막을 적용하였다.

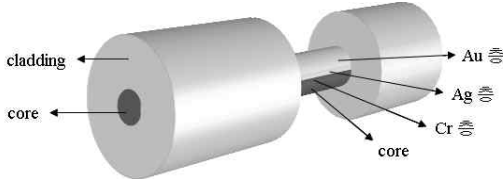


Fig. 1. Structure of fiber optic SPR sensor  
그림 1. 광섬유 SPR 센서의 개념도

## 2. Rigorous coupled wave analysis (RCWA)

격자에서의 광학적 회절 현상은 주기적으로 배열된 격자의 Fourier 계수와 벡터 광파간의 에너지 교환이 일어나면서 새로운 회절 성분들을 생성되고, 생성된 회절 성분들은 또다시 격자의 Fourier 계수와 반응하며 에너지 교환을 하게 된다. 이처럼 격자에 의한 광파의 회절은 스펙트럼 성분들 간의 에너지 교환 과정으로 이해할 수 있다.

이러한 회절 현상을 해석하는 대표적인 방법으로 rigorous coupled wave analysis (RCWA)가 있다. RCWA는 격자의 Fourier 표현에 기반하여 해당 구조의 정확한 맥스웰 방정식의 해를 구하는 방법이다. 이러한 RCWA는 단순한 격자 구조뿐만 아니라 광도파로의 해석, 고립된 단일 시스템의 특성 해석에도 널리 사용된다. 본 절에서는 기본적인 RCWA

에 대해 살펴보고, 이를 광섬유 SPR 센서에 적용하는 방법 및 그 결과에 대해 논의하겠다.

전자장의 시변항을  $\exp(-j\omega t)$ 이라 가정하고 x 방향으로만 유전을 변조가 있는 격자 구조의 TM 편광

있고, 기본적인 해석 구조는 그림 2와 같다[7].

$$\nabla \times \vec{E} = \hat{x}(\sigma_z E_x - \sigma_x E_z) = j\omega\mu_0 H_y \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= -\hat{x}\partial_z H_y + \hat{z}\partial_x H_y \\ &= -j\omega\epsilon_0\epsilon_r(x)(\hat{x}E_z + \hat{z}E_x) \end{aligned} \quad (2)$$

그림 2와 같이 격자의 주기를  $\Lambda$ 로 놓았을 때, 유전을 변조항  $\epsilon_r(x)$ 의 Fourier 전개는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, RCWA의 수렴성 문제를 해결하기 위해 필요한 역유전을 변조항  $\alpha_r(x)$ 의 Fourier 전개는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[8].

$$\epsilon_r(x) = \sum_{k=-M}^M \epsilon_k \exp(j\frac{2\pi h}{\Lambda} k) \quad (3)$$

$$\alpha_r(x) = \frac{1}{\epsilon_r(x)} = \sum_{k=-M}^M \alpha_h \exp(j\frac{2\pi h}{\Lambda} k) \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 M은 격자의 구조를 표현하는데 있어서의 Fourier truncation order이고, 이 값은 배열된 격자의 주기와 격자의 매질, 그리고 RCWA에서의 수렴성에 의해 증감하는 값이다.

입사 영역에서 빛이 들어올 경우, 격자의 Fourier 표현에 의해 회절되어 진행하는 빛과 회절되어 반사되는 빛이 생성된다. 회절되는 빛의 transverse wavevector  $k_x$ 는 Floquet condition 또는 Bloch theorem에 의해 식 (5)와 같이 결정되고, 이들 값은 전 영역에서 phase matching condition에 의해 보존된다[7].

$$k_{x,m} = k_{x,0} + m\frac{\lambda}{\Lambda} \quad (-M \leq m \leq M), \quad (5)$$

$$k_{x,0} = n_I k_0 \sin\theta_{inc}$$

입사의 입사 각도  $\theta_{inc}$ 를 갖는 입사파는 식 (6)과 같이 표현되고,  $l_1$ 를  $i$ 번째 격자층까지의 두께의 합이라 할 때,  $z < 0$ 인 입사 영역과  $z > l_N$ 인 출사 영역에서의 전기장은 식 (7), (8)과 같이 표현되고, 자기장은 식 (1)에 의해 식 (9), (10)과 같이 표현된다.

$$\vec{E}_{inc} = (\hat{x}u_x + \hat{z}u_z)\exp[j(k_{x,0}x + k_{z,l,0}z)] \quad (6)$$

$$u_x = \cos\theta_{inc}, \quad u_z = -\sin\theta_{inc}$$

$$\vec{E}_I = \vec{E}_{inc} + \sum_{m=-M}^M \left( \hat{x}R_{x,m} + \hat{z}R_{z,m} \right) \exp[j(k_{x,m}x - k_{z,l,m}z)] \quad (7)$$

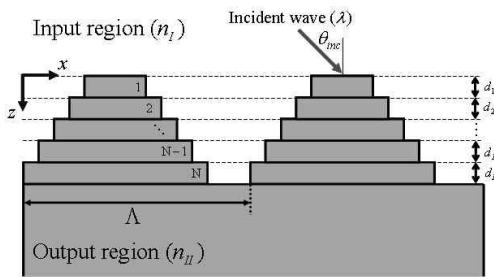


Fig. 2. Multi-grating structure for analyzed RCWA  
그림 2. RCWA에서 해석하는 다층 격자구조의 기본모식도에 대한 맥스웰 방정식은 식 (1)과 (2)같이 나타낼 수

$$\vec{E}_{II} = \sum_{m=-M}^M \begin{pmatrix} \hat{x} T_{x,m} + \hat{z} T_{z,m} \\ \exp[j(k_{x,m} + k_{zII,m}(z-l_N))] \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\vec{H}_I = \quad (9)$$

$$\hat{y} \frac{1}{\omega \mu_0} \left\{ \begin{aligned} & (k_{zI,0} u_x - k_{x,0} u_z) \exp[j(k_{x,0} x + k_{zI,0} z)] \\ & - \sum_{m=-M}^M \begin{pmatrix} (k_{zI,m} R_{x,m} + k_{x,m} R_{z,m}) \\ \exp[j(jk_{x,m} x - k_{zI,m} z)] \end{pmatrix} \end{aligned} \right\}$$

$$\vec{H}_{II} = \hat{y} \frac{1}{\omega \mu_0} \sum_{m=-M}^M \begin{pmatrix} (k_{zII,m} T_{x,m} - k_{x,m} T_{z,m}) \\ \exp[j(jk_{x,m} x - k_{zII,m}(z-l_N))] \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (6)~(10)에서의  $k_{zI,m}$  과  $k_{zII,m}$  는 각각 식 (11)과 (12)와 같이 표현된다.

$$k_{zI,m} = \sqrt{(n_I k_0)^2 - k_{x,m}^2} \quad (-M \leq m \leq M) \quad (11)$$

$$k_{zII,m} = \sqrt{(n_{II} k_0)^2 - k_{x,m}^2} \quad (-M \leq m \leq M) \quad (12)$$

격자 내부에서의 전자장 분포는 균일한 물질로 이루어진 입사 영역과 출사 영역에서의 전자장과는 달리, 각각 식 (13)과 (14)같이 space harmonic field의 Fourier 전개로 표현할 수 있다.

$$\vec{E}_i = \sum_{m=-M}^M \begin{pmatrix} \hat{x} S_{ix,m}(z) + \hat{z} S_{iz,m}(z) \\ \exp(jk_{x,m} x) \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\vec{H}_i = \hat{y} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sum_{m=-M}^M U_{iy,m} \exp(jk_{x,m} x) \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)를 식 (1)과 (2)에 대입하여 tangential 전자장간의 결합 방정식은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있고, 식 (15)로부터 각각의 tangential 성분의 2차 미분 방정식은 식 (16), (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} S'_{ix} \\ U'_{iy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & k_0 \left( \frac{k_{x,m}}{k_0} E_i^{-1} \frac{k_{x,m}}{k_0} - I \right) \\ k_0 E_i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{ix} \\ U_{iy} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$S''_{ix} = k_0^2 \left( \frac{k_{x,m}}{k_0} E_i^{-1} \frac{k_{x,m}}{k_0} - I \right) E_i S_{ix} \quad (16)$$

$$U''_{iy} = k_0^2 E_i \left( \frac{k_{x,m}}{k_0} E_i^{-1} \frac{k_{x,m}}{k_0} - I \right) U_{iy} \quad (17)$$

식 (15)~(17)에서  $E_i$  행렬은 식 (3)의 유전율의 Fourier 계수로 이루어진 행렬이고, 행렬의 (i,j) 성분은  $\epsilon_{i-j}$ 에 해당한다. 식(16)과 (17)의 시스템 행렬로부터 고유벡터 (eigenvector) 행렬과 고유값 (eigenvalue)의 대각 행렬을 구하면 i번째 격자 내부

에서의 접선방향의 전자장 분포를 구할 수 있다. 그러나 RCWA가 truncated Fourier 전개를 기반인 방법이기 때문에, truncation order M이 작을 경우 수렴성에 문제가 발생하고, 격자의 매질이 급속일 경우 수렴성 문제는 더욱 증가하게 된다. 이러한 수렴성 문제를 해결하기 위해 역유전율 행렬  $A_i$ 를 이용하여 식 (16), (17)을 각각 식 (18), (19)와 같이 변형시키면 수렴성이 증가하게 된다[7].

$$S''_{ix} = k_0^2 \left( \frac{k_{x,m}}{k_0} E_i^{-1} \frac{k_{x,m}}{k_0} - I \right) A_i^{-1} S_{ix} \quad (18)$$

$$U''_{iy} = k_0^2 A_i \left( \frac{k_{x,m}}{k_0} E_i^{-1} \frac{k_{x,m}}{k_0} - I \right) U_{iy} \quad (19)$$

식 (18)의 시스템 행렬로부터 고유벡터 (eigenvector) 행렬과 고유값 (eigenvalue)의 대각 행렬 Q를 구하면 i번째 격자 내부에서의 접선방향의 전자장 분포를 식 (20), (21)과 같이 구할 수 있다.

$$S_{ix,m} = \sum_{g=-M}^M \begin{pmatrix} W_{im,h} C_{ig}^+ \exp[q_{ig}(z-l_{i-1})] \\ + C_{ig}^- \exp[-q_{ig}(z-l_i)] \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$U_{iy,m} = \sum_{g=-M}^M \begin{pmatrix} V_{im,h} C_{ig}^+ \exp[q_{ig}(z-l_{i-1})] \\ + C_{ig}^- \exp[-q_{ig}(z-l_i)] \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$V_i = \frac{1}{k_0} \left( \frac{k_{x,m}}{k_0} E_i^{-1} \frac{k_{x,m}}{k_0} - I \right)^{-1} W_i Q_i$$

식 (20)과 (21)에서 i번째 격자층에서의 습방향, 역방향의 회절파 계수  $C_{ig}^+$  와  $C_{ig}^-$  는 각 격자층 사이의 경계 조건으로부터 구해진다. 입사 영역과 첫 번째 격자층에서의 경계 조건은, 입사 영역에서의 phase matching condition과 경계에서의 tangential field의 연속 조건에 의해 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (22)에서의  $X_1$ 은 첫 번째 격자층에서의 고유값과 격자층의 두께에 의한 phase 항으로 이루어진 대각 행렬이다.

$$\begin{pmatrix} \left( \frac{k_{zI,0}}{k_0} U_x - \frac{k_{x,0}}{k_0} u_z \right) I & K_1 \\ \left( \frac{k_{zI,0}}{k_0} U_x - \frac{k_{x,0}}{k_0} u_z \right) I & K_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{m,0} \\ R_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1 & W_1 X_1 \\ jV_1 - jV_1 X_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C^+ \\ C^- \end{pmatrix}$$

$$K_1 = -diag \left[ \frac{(k_{zI,m}/k_0)^2 + (k_{x,m}/k_0)^2}{k_{z,m}/k_0} \right] \quad (22)$$

이와 같은 방법으로, i번째 격자층과 i+1번째 격자층에서의 경계 조건은 식 (23)과 같이 나타낼 수 있

고, N번째 격자층과 출사 영역간의 경계 조건은 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} W_i X_i & W_i \\ j W_i X_i & -j V_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_i^+ \\ C_i^- \end{pmatrix} = \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} W_{i+1} & W_{i+1} \\ j V_{i+1} & -j V_{i+1} X_{i+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{i+1}^+ \\ C_{i+1}^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} W_N X_N & W_N \\ j W_N X_N & -j V_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_N^+ \\ C_N^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ K_2 \end{pmatrix} T_x$$

$$K_2 = \text{diag} \left[ \frac{(k_{z,II,m}/k_0)^2 + (k_{x,m}/k_0)^2}{k_{Iz,m}/k_0} \right] \quad (24)$$

식 (22)~(24)로부터  $R_x$ 와  $T_x$ 의 관계식은 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} u_x I & I \\ \left( \frac{k_{z,I,0}}{k_0} U_x - \frac{k_{x,0}}{k_0} u_x \right) I & K_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{m,0} \\ R_x \end{pmatrix} = \left\{ \prod_{i=1}^N \left[ \begin{pmatrix} W_i & W_i X_i \\ j V_i & -j V_i X_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_i X_i & W_i \\ j W_i X_i & -j V_i \end{pmatrix} \right] \right\} \begin{pmatrix} I \\ K_2 \end{pmatrix} T_x \quad (25)$$

식 (25)는 해석적으로 정확한 표현이지만, 수치적으로 상당히 불안정한 요소를 가지고 있다. 격자층의 두께와 고유값으로 구성된 phase 항을 표현하는 대각 행렬 X의 경우, 해당 고유값이 나타내는 손실이 매우 크거나 두께가 두꺼워질 경우, X의 대각 성분들이 컴퓨터상으로는 표현할 수 없는 작은 값을 가지게 되어 거의 0으로 수렴하게 된다. 그러나 이렇게 작은 값들은 역행렬을 구할 경우 발산하게 되어 심한 오차를 발생하거나 발산하게 된다. 따라서 이러한 불안정한 요소들을 보완하기 위해 enhanced transfer matrix method (ETMM)을 사용한다[9]. ETMM의 기본 개념은 식(25)를 풀 때 phase 항 X의 역행렬이 나타나지 않도록 치환하여 불안정적인 요소를 제거하는 것이다.

N 번째 격자층과 출사 영역간의 경계 조건은 식 (24)와 같이 나타나고, N번째 격자층의 시스템 행렬을 식 (26)과 같이 정의하면, 식 (24)는 식 (27)과 같이 표현할 수 있다.

$$SYS_i = \begin{pmatrix} W_i & W_i \\ j V_i & -j V_i \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{pmatrix} C_N^+ \\ C_N^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_N 0 \\ 0 I \end{pmatrix}^{-1} SYS_N^{-1} \begin{pmatrix} I \\ K_2 \end{pmatrix} T_x = \begin{pmatrix} X_N^{-1} a_N \\ b_N \end{pmatrix} T_x \quad (27)$$

식 (27)의 우항에서 X의 역행렬 계산을 피하기 위

해  $T_x$ 를 치환하면 식 (28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} C_N^+ \\ C_N^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_N^{-1} a_N \\ b_N \end{pmatrix} T_x = \begin{pmatrix} I \\ b_N a_N^{-1} X_N \end{pmatrix} T_x^{(1)} \quad (28)$$

이와 같은 방식으로 i번째 격자층과 i+1 번째 격자층간의 경계 조건까지 반복적으로 치환을 하게 되면 식 (29)와 같이 나타낼 수 있고, 입사 영역까지의 치환식은 식 (30)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} C_i^+ \\ C_i^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i^{-1} a_i \\ b_i \end{pmatrix} T_x^{(N-i)} = \begin{pmatrix} I \\ b_i a_i^{-1} X_i \end{pmatrix} T_x^{(N+1-i)} \quad (29)$$

$$\begin{pmatrix} u_x I & I \\ \left( \frac{k_{x,I,0}}{k_0} u_x - \frac{k_{x,0}}{k_0} u_x \right) I & K_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{m,0} \\ R_x \end{pmatrix} = SYS_1 \begin{pmatrix} I \\ X_1 b_1 a_1^{-1} X_1 \end{pmatrix} T_x^{(N)} \quad (30)$$

식 (30)으로부터  $R_x$ 와  $T_x(N)$ 를 안정적으로 구할 수 있고, 구해진  $T_x(N)$ 으로부터 출사 영역에서의  $T_x$ 를 식 (31)과 같이 구할 수 있고, 격자층 내부 영역에서의 계수는 식 (21)로부터 구할 수 있다.

$$T_x = a_N^{-1} X_N \cdot a_{N-1}^{-1} X_{N-1} \cdots \cdot a_1^{-1} X_1 \cdot T_x^N \quad (31)$$

이와 같이 구한  $R_x$ 와  $T_x$ 로부터 반사 회절 효율과 투과 회절 효율은 각각 식 (32), (33)과 같이 구할 수 있고, 구해진 회절 효율로부터 격자 시스템의 에너지를 식 (34)와 같이 구할 수 있다.

$$DE_{r,m} = |R_{x,m}|^2 \text{Re} \left( \frac{k_{z,I,m}}{k_0 n_r \cos \theta_{\infty c}} \right) \quad (32)$$

$$DE_{t,m} = |T_{x,m}|^2 \text{Re} \left( \frac{k_{z,II,m}}{k_0 n_t \cos \theta_{\infty c}} \right) \quad (33)$$

$$\text{energy} = \sum_{m=-M}^M (DE_{r,m} + DE_{t,m}) \quad (34)$$

유전체로만 구성된 격자 구조에서는 에너지의 손실이 없기 때문에, 에너지 보존 법칙에 따라 식 (34)로부터 구한 에너지가 반드시 1이 나온다. 그러나 금속과 같이 손실이 있는 물질로 이루어진 격자 구조에서는 에너지 손실로 인하여 항상 1보다 작게 나온다.

이러한 RCWA 방법을 광섬유 SPR 센서를 해석하는 데 적용하였다. 실제 제작과정에서의 fabrication resolution을 감안하여 접착제 역할을 하는 Cr의 두께가 가장 두꺼운 모델인 Cr=6nm 에 대하여 스펙트럼

을 해석하였다. 그림 3은 두 가지 해석방법을 비교한 것인데 RCWA와 어드미턴스 해석방법이 약간의 차이를 주고 있다는 것을 알 수 있다. 어드미턴스 방법에 비해 RCWA는 무한가정이 아닌 유한한 코어 및 클래딩의 두께를 고려할 수 있어 매우 정확하다 할 것이다. 하지만 계산 시간이 일반적인 모델을 기준으로 4 배정도 걸리기 때문에 정확도가 요구되는 곳에 시행하기 위해서는 해석 시간도 충분히 고려해야 한다. 그림에서 알 수 있듯이 센서의 모양 및 대략적인 경향을 추측할 때는 어드미턴스 방법도 매우 유용하다 할 것이다.

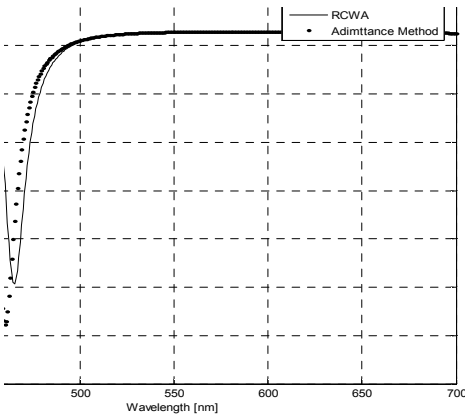


Fig. 3. Compare RCWA with admittance method  
 그림 3. RCWA와 어드미턴스해석 방법 스펙트럼비교

3. 스트레인 및 온도 측정

2장에서 유도한 RCWA의 수식을 이용하여 정밀한 스

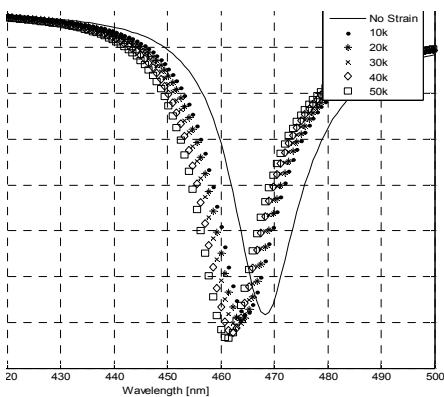


Fig. 4. A variation of the spectrum by the strain  
 그림 4. 스트레인에 의한 스펙트럼의 변화

트레인 및 온도 변화 측정을 실시하였다. 정해진 두께와 물질이 정해져 SPR 센서가 구성이 되면 각 파장에서의 투과율(Transmittance)가 계산이 되는데 이를 파장별로 나타낸 다음, dip 위치 변화를 측정하여 스트레인의 양과 온도 변화의 양을 측정한다.

가. 광섬유 SPR센서를 이용한 스트레인 측정

광섬유 SPR 센서는 전력기구나 전력선로 등 여러 가지 전력 건축물 등의 안전 진단과 상시 진단, 모니터 장치로서 이용될 수 있다. 구조물 내에 광섬유 센서를 직접 삽입하더라도 광섬유 센서의 물리적인 부피, 무게 등이 매우 작기 때문에 교량의 기계적 특성과 안정성에 영향을 미치지 않는다. 따라서 전력구조물의 진동이나 스트레인을 측정하는 장치로서 기존의 전기적인 진단 장치에 비해 설치 및 진단이 용이하다.

그림 4는 스트레인특성을 광섬유 SPR에 부가되는 스트레인을 모델링하여 그 값의 변화에 따른 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. 이의 dip의 위치를 이용하여 스트레인의 양을 측정할 수 있는 것이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 50000 $\mu\epsilon$  까지 매우 넓은 범위에서 dip 파장의 변화가 거의 선형의 성질을 보여 주므로 스트레인 센서로서 좋은 resolution을 지니고 있다.

나. 광섬유 SPR센서를 이용한 온도 측정

광섬유 SPR 센서는 전력기구나 전력선로 등 여러 가지 전력 그림 5는 부가된 온도에 따른 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. 온도는 0 $^{\circ}\text{C}$ -100 $^{\circ}\text{C}$  까지 20 $^{\circ}\text{C}$ 의 간격으로 가해진다고 가정하였다. 이 결과는 넓은 범위에서의 온도 변화에서도 그 효과를 측정해 낼 수 있고 또한 동적 측정에도 아무 제약이 없다.

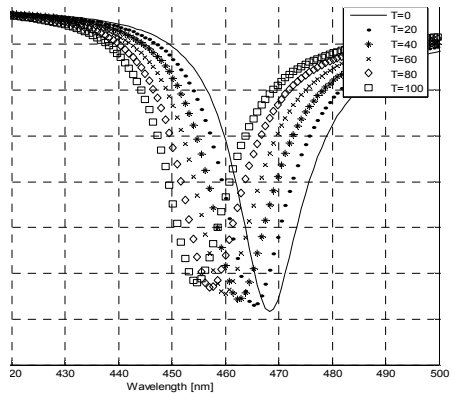


Fig. 5. A variation of the spectrum by the temperature  
 그림 5. 온도에 의한 스펙트럼의 변화

### III 결론

본 논문에서는 광섬유 SPR 센서를 이용하여 스트레인과 온도 측정을 하였다. 해석 방법으로는 RCWA 방법을 사용하였다. 이 방법은 유한한 코어와 클래딩의 두께를 고려하므로 어드미턴스 방법보다 정확한 해석을 할 수 있다. 스트레인과 온도측정 결과 모두에서 dip의 파장에 따른 변화가 거의 선형성을 보인다는 것을 증명하였고, 이는 광섬유 SPR 센서가 좋은 resolution을 보인다는 것을 의미한다. 광섬유를 이용한 SPR 센서가 다른 센서에 비하여 크기가 작고 안전성이 높다는 장점을 고려해 볼 때, 다양한 분야에서 센서로서의 활용이 기대된다.

### 참고문헌

- [1] E. Kretschmann and H. Raether, "Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light," *Z.Naturforsch.*, vol.23A, pp.2135-2136, 1968.
- [2] A. Otto, "Excitation of surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection," *Z.Physik.*, vol.216, pp.398-410, 1968.
- [3] I. Pockrand, J. D. Swalen, J. G. Gordan, and M. R. Philpott, "Surface Plasmon spectroscopy of organic monolayer assemblies," *Surf. Sci.*, vol.74, pp.237-244, 1978.
- [4] B. Liedberg, C. Nylander, and I. Sundstrom, "Surface Plasmon resonance for gas detection and biosensing," *Sens.Actuators*, vol.4, pp.299-304, 1983.
- [5] S. L. Jung, C. T. Campbell, T. M. Chinowsky, M. N. Nar, and S. S. Yee, "Quantitative interpretation of the response of surface plasmon resonance sensors to absorbed films," *Langmuir*, vol.14, pp.5636 - 5648, 1998.
- [6] J. Homola, S. S. Yee and G. Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors: review," *Sens. Actuators B*, vol.54 ,pp.3 - 15, 1999.
- [7] M. G. Moharan, E. B. Grann, D. A. Pommet, and T. K. Gaylord, "Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 12, no. 5, pp. 1068-1076, 1995.
- [8] P. Lalanne, and G. M. Morris, "Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, no. 4, pp. 779-784, 1996.
- [9] E. A. Stern as quoted by R. A. Ferrel, *Phys.*

Rev., 111, 1214, 1958.

### 저자소개

#### 정재훈 (정회원)



1994년 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학사)  
 1996년 : 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)  
 2000년 : 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업 (공학박사)  
 2000~2003년 : 삼성전자 정보통신총괄 광사업부 책임연구원

2003~2005년 : 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 전임강사

2005~ 현재 : 단국대학교 전자컴퓨터공학부 조교수

2005~ 현재 : 단국대학교 전자컴퓨터공학부 조교수

#### 김민욱 (학생회원)



2005년 : 단국대학교 전기전자컴퓨터공학과 졸업 (공학사)  
 2005~ 현재 : 단국대학교 대학원 전자컴퓨터공학과 (석사과정)